

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**

THIS PAGE BLANK (USPTO)

00P 1866A



19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

12 **Offenlegungsschrift**
10 **DE 198 18 292 A 1**

51 Int. Cl.⁶:
G 01 R 33/54
G 01 R 33/56
G 01 R 33/32

21 Aktenzeichen: 198 18 292.9
22 Anmeldetag: 23. 4. 98
43 Offenlegungstag: 3. 12. 98

DE 198 18 292 A 1

66 Innere Priorität:
197 22 483. 0 28. 05. 97
71 Anmelder:
Siemens AG, 80333 München, DE

72 Erfinder:
Heid, Oliver, Dr., 91710 Gunzenhausen, DE

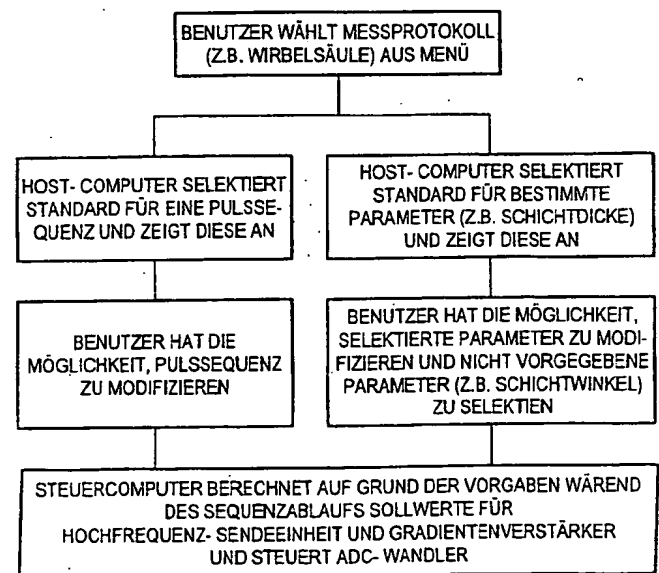
Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Verfahren zur Steuerung der Pulssequenz für eine Kernspintomographieanlage und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens

57 Verfahren zur Steuerung der Pulssequenz für eine Kernspintomographieanlage und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens.

Die Berechnung eines Steuerdatensatzes wird während der Laufzeit der Sequenz vorgenommen, so daß der Sequenzablauf mit minimaler zeitlicher Latenz unter optimaler Nutzung des Gradientensystems nicht deterministisch gesteuert werden kann.



DE 198 18 292 A 1

Verfahren zur Steuerung der Pulssequenz für eine Kernspintomographieanlage und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens.

Zum Meßablauf bei einer Kernspintomographieanlage sind im wesentlichen der Zeitverlauf von Gradientenströmen, Hochfrequenz-Sendepulse und Samplingperioden für das gewonnene MR-Signal zu steuern. Die entsprechenden Steuerdatensätze werden bei den heute üblichen Steuerungen im wesentlichen vor dem Sequenzstart vorberechnet. Dabei greift man auf abgespeicherte Zeitverläufe, z. B. für die Anstiegs- und Abfallflanken, von Gradientenströmen zurück. Während des Sequenzablaufs wird dann der Meßvorgang in Form einer Liste "abgespielt". Eine derartige Steuerung ist z. B. aus der US-Patentschrift 5,349,296 bekannt.

Da der gesamte Sequenzablauf bei Sequenzstart bereits festgelegt ist, kann man nach dem Sequenzstart nur noch schwer und sehr eingeschränkt auf den weiteren Sequenzablauf Einfluß nehmen. Im wesentlichen ist nur ein eingeplantes Anhalten und Warten auf ein externes Triggersignal möglich. Es muß ein großes Datenvolumen abgespeichert werden. Um dieses Datenvolumen einigermaßen in Grenzen zu halten, werden typischerweise Teile der Sequenztopologie in Form einer Schleifenstruktur abgebildet. Im Datensatz sind also z. B. Schleifenanweisungen enthalten. Damit wird die Beschreibungs- "Sprache" für den Datensatz komplex und unflexibel.

Aus der US-Patentschrift 5,144,242 ist eine Steuereinrichtung für MR-Geräte bekannt, bei der ein Speicher für Steuerbefehle kontinuierlich aus einem Massenspeicher nachgeladen wird, während die Sequenz abgearbeitet wird. Damit wird der Speicher für Steuerbefehle entlastet. Eine ähnliche Steuereinrichtung ist auch aus der US-Patentschrift 5,606,258 bekannt.

In der US-Patentschrift 5,512,825 ist ein Verfahren beschrieben, zur Minimierung von Totzeiten für die Gradienten Anfangs- und Endwerte sowie ein Moment für den Gradientenverlauf anzugeben.

Bei der Definition von Gradienten ist zu unterscheiden zwischen den sogenannten "logischen" Gradienten und den "physikalischen" Gradienten. Diese Unterscheidung wird dadurch notwendig, daß mit Kernspintomographiegeräten beliebig schräge Schichten abgebildet werden können. Diese schrägen Schichten werden durch Vorgabe von logischen Gradienten definiert, die in einem kartesischen Koordinatensystem entsprechend schräg liegen. Jede Gradientenspule kann natürlich nur einen Gradienten in einer festgelegten Richtung, nämlich nur in einer Achse eines physikalischen kartesischen Koordinatensystems liefern. Diese Gradienten werden als physikalische Gradienten bezeichnet. Die schrägen logischen Gradienten werden daher durch Überlagerung von physikalischen Gradienten erzeugt, mathematisch gesehen durch eine Vektoraddition. Damit entsteht jedoch folgendes Problem: Bei herkömmlichen Anlagen werden die logischen Gradienten typischerweise in Form von Trapez-Pulsen definiert. Bei einer Überlagerung mehrerer logischer Gradienten sind die physikalischen Gradienten dann typischerweise nicht mehr trapezförmig, sondern weisen einen komplexen Strom-Zeit-Verlauf auf, der vom Gradientenverstärker beherrscht werden muß. Der maximale Anstieg der Gradientenflanken der physikalischen ist bei jedem Gradientensystem durch die sogenannte Slewrates begrenzt. Ferner ist natürlich auch die Gradienten-Amplitude begrenzt. Bei der Definition der logischen Gradienten wird nicht vorherbestimmt, welche Anstiegszeiten und welche Amplituden sich bei den physikalischen Gradienten ergeben, da diese erst bei Sequenzablauf aus den logischen Gradienten berechnet werden. Andererseits muß aber bei der Definition von vorbereiteten Datensätzen für die logischen Gradienten die Begrenzung der Anstiegszeit und der Amplituden der physikalischen Gradienten berücksichtigt werden. Es muß z. B. immer vom ungünstigsten Fall ausgegangen werden, daß alle Gradientenanstiege auf einen physikalischen Gradienten treffen. Damit ist nur eine schlechte Ausnutzung der Gradienten-Hardware möglich.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zur Steuerung einer Pulssequenz bzw. eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens so auszugestalten, daß die obengenannten Nachteile vermieden werden.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe durch ein Verfahren nach Anspruch 1 bzw. eine Vorrichtung nach Anspruch 8 gelöst. Hierbei wird aus Sequenzdaten, die im k-Raum vorgegeben sind, während der Laufzeit der Pulssequenz ein Steuerdatensatz für Gradientenverstärker und einen Hochfrequenz-Sende- und Empfangskanal berechnet. Damit ist ein Eingriff in die laufende Sequenz, also eine Änderung der Sequenzparameter möglich. Durch eine geringe Latenzzeit von maximal einer Zeitscheibe ergibt sich ein geringer Speicherplatzbedarf.

Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben. Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung wird nachfolgend anhand der Fig. 1 bis 11 näher erläutert. Dabei zeigen:

Fig. 1 schematisch den Aufbau eines Kernspintomographiegeräts,

Fig. 2 etwas detaillierter den Aufbau der Anlagensteuerung,

Fig. 3 einen Teil einer typischen Pulssequenz,

Fig. 4 die Belegung einer Rohdatenmatrix im k-Raum

Fig. 5 ein Flußdiagramm einer herkömmlichen Steuerung,

Fig. 6 die herkömmliche Einteilung einer Pulssequenz in einzelne Zeitscheiben,

Fig. 7 die herkömmliche Definition einer Gradientenanstiegsflanke,

Fig. 8 das generelle Konzept der erfindungsgemäßen Steuerung,

Fig. 9 die Aufteilung der Sequenzsteuerung,

Fig. 10 ein Flußdiagramm einer Ausführungsbeispiels der neuen Steuerung,

Fig. 11 ein Gradientendiagramm.

In Fig. 1 ist stark schematisiert der übliche Aufbau eines Kernspintomographiegeräts dargestellt. Dieses besteht aus einem inhomogenes Grundfeld erzeugenden Magnetsystem 1 bis 4, das von einer Stromversorgung 11 gespeist wird. Im Magnetsystem sind Gradientenspulensysteme 7, 8 vorgesehen, die von einem Gradientenverstärker 12 angesteuert werden. Die Gradientenspulensysteme sind zur Erzeugung von Magnetfeldgradienten in drei Raumrichtungen x, y, z eines Koordinatensystems 6 ausgeführt. Das Untersuchungsobjekt 5 ist von einer Hochfrequenzantenne 9 umgeben, die mit einer Hochfrequenz-Sendeeinheit 14 sowie mit einer Hochfrequenz-Empfangeinheit 15 verbunden ist. Die Hochfrequenz-Sendeeinheit 14 und die Hochfrequenz-Empfangeinheit 15 sind Bestandteil eines Hochfrequenzsystems 16, in

dem unter anderem die empfangenen Signale abgetastet und phasenempfindlich demoduliert werden. Aus den demodulierten Signalen wird mit einem Bildrekonstruktionsrechner 17 ein Bild erstellt, an einen Hostrechner 20 weitergegeben und auf einem Monitor 18 abgebildet. Die gesamte Einheit wird von einem Steuerrechner 20 angesteuert. Die Hardware-Steuerung übernimmt ein Steuerungsrechner 21, der an den Hostrechner 20 angeschlossen ist. Die gesamte Anlagensteuerung ist in Fig. 2 noch etwas genauer dargestellt. Der Steuerungsrechner 21 enthält eine Standard-CPU, auf der die eigentliche Meßsequenz abläuft. An diese CPU sind mindestens eine Hochfrequenz-Sendeeinheit 14, mindestens eine Hochfrequenz-Empfangeinheit 15 und drei digitale Signalprozessoren (DSP) 22, 23 und 24 gekoppelt. Die Gradienten-DSPs können via Interrupts Daten von der Steuerungs-CPU anfordern, sobald ihr lokaler Puffer leergelaufen ist. Weiter besteht eine digitale Verbindung zum Bildrekonstruktionsrechner 17, um die Datenerfassung mit der Bildrekonstruktion zu synchronisieren. Ein Bus zum Hostrechner 20 erhält eine Echtzeit-Verbindung zwischen dem Host und der Steuerungs-CPU aufrecht, um dem Benutzer die Möglichkeit zu geben, auch während der Messung auf den Meßablauf einzuwirken.

Ein Beispiel für eine Pulssequenz ist in Fig. 3 dargestellt. Jede Pulssequenz läßt sich einteilen in eine Sendephase, in der – unter Umständen unter gleichzeitiger Einwirkung eines definierten Gradienten (G_s in Fig. 3) – ein Hochfrequenzpuls eingestrahlt wird. Schließlich gibt es den "WARP"-Zustand, in dem z. B. durch ein definiertes Gradientenzeitintegral eine Phasencodierung der Kernspins erfolgt oder auch eine spezielle Flußcodierung, eine bestimmte Diffusionscodierung usw. Der WARP-Zustand dient ferner dazu, die Kontinuität und Stetigkeit der Gradientenströme zwischen den angrenzenden Zeitscheiben herzustellen. Während des WARP-Zustands sei keine Hochfrequenzaktivität erlaubt.

Weiter gibt es den Empfangszustand (in Fig. 3 mit ADC bezeichnet), in dem mit einem Analog/Digital-Konverter das entstehende Signal abgetastet wird. Dabei ist die Möglichkeit eines gleichzeitig definierten Feldgradienten (GR in Fig. 3) vorgesehen.

Schließlich gibt es Wartezustände, in denen keine Gradientenfelder aktiv sind und weder gesendet noch empfangen wird. Diese können als Sonderfall des WARP-Zustands gesehen werden.

Die Pulssequenz nach Fig. 3 wird N mal mit unterschiedlichen Amplituden-Zeitintegralen des Phasencodiergradienten GP wiederholt, so daß man N unterschiedlich phasencodierte Signale S erhält. Jedes Signal wird m mal abgetastet und die einzelnen Meßwerte in eine Zeile einer in Fig. 4 schematisch dargestellten Rohdatenmatrix RD eingetragen. Diese Rohdatenmatrix kann man als Meßdatenraum betrachten, der im allgemeinen als k -Raum bezeichnet wird. Für den k -Raum gilt folgende Definition:

$$k_x(t) = \gamma \int_0^t G_x(t') dt' \quad 30$$

$$k_y(t) = \gamma \int_0^t G_y(t') dt' \quad 35$$

$$k_z(t) = \gamma \int_0^t G_z(t') dt' \quad 40$$

Dabei ist γ die Larmorkonstante und G_x , G_y , G_z ein Magnetfeldgradient in der Richtung x , y bzw. z eines kartesischen Koordinatensystems. Auf die Pulssequenz nach Fig. 3 übertragen, könnte z. B. der Schichtselektionsgradient GS in z -Richtung, der Phasencodiergradient GP in y -Richtung und der Auslesegradient GR in x -Richtung liegen, so daß für diesen Fall also gilt:

$$G_z = GS, G_y = GP, G_x = GR. \quad 50$$

Aus einem Rohdatensatz im k -Raum, also der Rohdatenmatrix RD nach Fig. 4, kann man nun ein Bild rekonstruieren, da zwischen dem Ortsraum (also dem Bild) und dem k -Raum mathematisch der Zusammenhang über folgende mehrdimensionale Fourier-Transformation besteht:

$$S(k_x, k_y, k_z) = \iiint \rho(x, y, z) e^{i(k_x x + k_y y + k_z z)} dx dy dz \quad 55$$

Dabei ist $\rho(x, y, z)$ die Spindichteverteilung und S das erhaltene Signal. Da die Meßwerte als diskrete numerische Werte vorliegen, wird die Fourier-Transformation als diskrete Fourier-Transformation mittels FFT (Fast Fourier Transform)-Verfahren durchgeführt.

Wie bereits oben erwähnt, belegt jedes Signal S eine Zeile der Rohdatenmatrix. Die Zeilenposition ist dabei entsprechend den obigen Ausführungen durch den Wert k_y , also durch das Zeitintegral über den vorausgehenden Phasencodiergradienten GP festgelegt.

Aufgabe der Pulssequenzsteuerung ist es nun, Hochfrequenzsender, Empfangskanal und Gradientenverstärker so zu steuern, daß genau die gewünschte Pulssequenz erzielt wird. Dabei gibt es eine Reihe von unterschiedlichen Sequenzty-

pen, die man auch als Sequenztopologie bezeichnen kann. In einer groben Einteilung sind dies z. B. Gradientenechosequenzen und Spinechosequenzen. Diese Gruppen von Pulssequenzen lassen sich wiederum feiner unterteilen, z. B. in FLASH-Sequenzen, FISP-Sequenzen, Turbospinechosequenzen und EPI-Sequenzen, um nur einige Beispiele zu nennen. Um die Bedienung so einfach wie möglich zu machen, stellt man in einem Menü verschiedene anatomische Bereiche (z. B. lumbale Wirbelsäule) mit jeweils optimierten Pulssequenzen zur Verfügung. Der Benutzer soll jedoch andererseits die Möglichkeit haben, die Pulssequenzen auf seine speziellen Bedürfnisse zuzuschneiden.

Ein Flußdiagramm für den Ablauf einer herkömmlichen Sequenzsteuerung ist in Fig. 5 dargestellt. Der Benutzer kann zunächst ein Meßprotokoll (z. B. lumbale Wirbelsäule) aus einem Menü auswählen. Ein HOST-Computer selektiert daraufhin einen Standard für eine Pulssequenz, die für diesen anatomischen Bereich in der Regel die optimalen Ergebnisse liefert, und zeigt diese an. Der Benutzer hat aber noch die Möglichkeit, diese Pulssequenz nach seinen eigenen Bedürfnissen zu modifizieren. Zu jeder Pulssequenz gehören noch verschiedene Parameter, z. B. die Repetitionszeit, die Echozeit, das Field of View, die Schichtdicke, die Matrixgröße und der Flipwinkel. Der HOST-Computer wählt aufgrund der Anatomie-Selektion auch für diese Parameter einen Standard aus und zeigt diesen an. Der Benutzer hat auch hier die Möglichkeit, selektierte Parameter zu modifizieren und nicht standardmäßig vorgegebene Parameter, z. B. den Schichtwinkel, zu selektieren.

Aufgrund des ausgewählten Meßprotokolls sowie aufgrund der vom Benutzer eingestellten Parameter und Sequenzmodifikationen wird nun aus einer "Bibliothek" eine Sequenzdatei geladen und Berechnungen in bezug auf Sequenzparameter (z. B. Schichtdicke) werden durchgeführt. Das Sequenzprogramm setzt die Meßparameter in eine Folge von "logischen" Gradientenpulsen um. Aus der Überlagerung dieser Pulse entstehen drei logische Gradientenstrom-Zeitfunktionen im logischen Koordinatensystem PRS (Phasencodier-, Readout- und Schichtrichtung). Diese werden dann zeitäquidistant diskretisiert in einem Gradientenverlaufsspeicher zusammengestellt. Um Schichten realisieren zu können, die in einem vom Gradientenpulssystem vorgegebenen physikalischen bzw. kartesischen Koordinatensystem (x,y,z) schräg liegen, werden die im logischen Koordinatensystem gegebenen Stromsollwerte punktweise in das physikalische Koordinatensystem abgebildet. Hierzu kann man z. B. eine Matrix-Vektor-Multipliziereinheit einsetzen, wie sie im US-Patent 5,349,296 beschrieben ist.

Aufgrund dieser Berechnungen hält man einen Datenstrom von Stromsollwerten, die punktweise an Digital-Analog-Konverter zur Ansteuerung der Gradientenverstärker weitergegeben werden.

Wie in Fig. 5 gezeigt, wird für die Ansteuerung die gesamte Pulssequenz in einzelne Zeitscheiben zerlegt, in denen jeweils eine Aktion ausgelöst wird. Diese Aktion kann z. B. ein Konstanthalten aller Gradienten, eine Anstiegsflanke eines bestimmten Gradienten und eine Abfallflanke eines bestimmten Gradienten sein. Die Gradientenflanken selbst werden definiert durch einen Startwert und eine Änderung Δ innerhalb der Zeitscheibe. Der Verlauf der Gradientenflanke ist in einer Tabelle abgelegt, auf die die Pulssequenzsteuerung zugreift. Diese Tabelle kann – wie in Fig. 6 dargestellt – eine lineare Gradientenanstiegsflanke definieren. Es können aber auch noch andere Tabellen für Gradientenflanken, z. B. eine sinusförmige Flanke, vorliegen.

Wie bereits eingangs erwähnt, ist dieses Verfahren, bei dem der Verlauf der Gradienten, Hochfrequenzaktivitäten und der Empfangsaktivitäten im wesentlichen vor dem Start der Messung berechnet werden, wenig flexibel, da es keine Änderung der Parameter in der laufenden Sequenz ermöglicht. Ferner weist es, da alle vorberechneten Werte abgespeichert werden müssen, einen hohen Speicherplatzbedarf auf. Schließlich wird aus den eingangs erläuterten Gründen die mögliche Performance der Gradientenverstärker wegen der notwendigen Worst-Case-Dimensionierung nicht optimal ausgenutzt. Die punktweise Abbildung vom logischen in das physikalische Koordinatensystem ist äußerst rechenintensiv.

Gemäß der Erfindung geschieht die Rotation der logischen in die physikalisch realisierten Gradienten-Zeitfunktionen durch Abbildung der Gradienten-Zeit-Integrale (GT-Momente) vom logischen in das physikalische Koordinatensystem vor dem Entwurf der Gradientenstrom-Zeitfunktionen. Die Gradientenstrom-Zeitfunktionen werden danach zeitscheibenweise in Echtzeit aus den Amplituden der angrenzenden Zeitscheiben und den zu realisierenden Gradienten-Zeit-Integralen für jede physikalische Gradientenachse berechnet und in Form von Gradientenamplituden-Zeitpunkt-Tupeln an die digitalen Signalprozessoren für die Gradienten übergeben. Dadurch wird die rechenintensive und zeitkritische Abbildung der Stützstellen-Datenströme vermieden. Die Drehung der Gradientenzeit-Integrale vom logischen in das physikalische Koordinatensystem sowie die Berechnung der Gradientenamplituden-Zeitfunktion geschieht in der Steuerungs-CPU 21 nach Fig. 2.

Im Verlauf einer Messung erhält jeder der drei digitalen Signalprozessoren 22 bis 24 nach Fig. 2 von der Steuerungs-CPU 21 eine Kette von Gradientenamplituden-Zeitpunkt-Tupeln, die Eckpunkte im Gradienten-Zeitverlauf darstellen. Die digitalen Signalprozessoren 22 bis 24 interpolieren in Echtzeit aufeinanderfolgende Tupel zu Gradientensollwerten auf einem diskreten Gradientenabtastraster. Erreicht dabei die Systemuhr die Sollzeit des Zieltupels, so wird dieses verworfen und durch das nächste Tupel ersetzt, bis auch dessen Sollzeit erreicht ist usw. Die jeweiligen Zielzeiten müssen nicht auf dem Abtastraster liegen, so daß es möglich ist, die Gradientenrampen mit einer wesentlich feineren als der durch das Abtastraster vorgegebenen zeitlichen Auflösung zu verschieben. Damit kann das realisierte Gradientenzeitintegral auch bei grober Diskretisierung der Gradientenamplitude präzise kontrolliert werden.

Neben dieser Interpolation errechnen die digitalen Signalprozessoren 22 bis 24 eine Vorverzerrung der Gradientenströme zur Kompensation der gradienteninduzierten Wirbelströme und Frequenzoffset-Werte zur Kompensation gradienteninduzierter Verschiebungen des Grundmagnetfeldes mittels Verstimmung eines Hochfrequenzsynthesizers, der das Hochfrequenzsystem steuert.

Das generelle Konzept eines solchen Vorgehens ist in Fig. 8 dargestellt. MR-Sequenzen lassen sich in mehrere Hierarchiestufen aufgliedern:

- Die äußere Schicht repräsentiert die Sequenztopologie, z. B. FLASH, Spinecho, Turbospinecho usw.
- Die darunterliegende Schicht (grobe k-Raum-Struktur) repräsentiert z. B. die Segmentierungsart des k-Raums. Beispielsweise gibt es Sequenzen, bei denen der k-Raum nicht in zeitlich linearer Reihenfolge belegt wird oder in denen nur der halbe k-Raum erfaßt wird.

- Die innere Schicht (feine k-Raum-Struktur) entspricht detaillierten Problemen, wie der Verteilung eines Phasencodiergradienten auf mehrere Zeitscheiben, z. B. vor und hinter einem 180°-Puls bei Spinechosequenzen.
- Die innerste Schicht (Einzelpuls-Gradientensynthese) repräsentiert z. B. die Synthese der Gradientenform zwischen zwei Hochfrequenzaktivitäten.

Nur die innerste Schicht ist hardwarenah, d. h., sie benötigt eine detaillierte Kenntnis der Geräteparameter. Alle äußeren Schichten beeinflussen direkt das Kontrastverhalten und repräsentieren nicht maschinenspezifische Kenntnisse, beispielsweise Relaxationszeiten und Entscheidungen betreffend die Sequenztopologie.

Die innerste Schicht (und nur diese) stellt eine Abstraktionshülle um die Scanner-Hardware dar und bietet sich daher für eine Automatisierung an. Dementsprechend wird bei der Sequenzsteuerung wie folgt vorgegangen:

Die Berechnung des Steuerdatensatzes wird während der Laufzeit der Sequenz vorgenommen. Dadurch kann der Sequenzablauf mit minimaler zeitlicher Latenz nicht deterministisch gesteuert werden. Außerdem entfällt der Speicherplatzbedarf für den Steuerdatensatz, da nur der gerade benötigte Teil "on demand" berechnet wird.

Die Berechnung des Steuerdatensatzes wird in zwei Teile geteilt, nämlich die oben erläuterte innerste Schicht und den Rest. Der der innersten Schicht entsprechende Teil wird vom Betriebssystem der Steuerung geleistet, die anderen Hierarchiestufen entsprechen dagegen dem eigentlichen Sequenzprogramm.

Dieses Vorgehen ist schematisch anhand eines Blockschaltbilds nach Fig. 9 dargestellt. Es wird zunächst vom Bediener eine Sequenztopologie ausgewählt und dazugehörige Parameter, wie z. B. Repetitionszeit TR, Echozeit TE, Betrachtungsfenster FOV, Schichtdicke, Matrixgröße, Flipwinkel und Schichtwinkel. Anschließend wird das Sequenzprogramm erstellt. Dieses gibt Spezifikationen in Form von k-Raumvektoren, von Zeitangaben und vom Sende- bzw. Empfangszustand, an die sogenannte k-Raummaschine weiter, die aus diesen Größen während des Sequenzablaufs Steuersignale an Gradientenverstärker und Hochfrequenzsende- und Empfangseinheit liefert. Der Begriff "k-Raum-Maschine" wurde deshalb gewählt, weil hier nicht wie üblich Gradientenamplituden, sondern direkt k-Raumwerte übergeben werden, was die Programmierung wesentlich vereinfacht. In einem Zustandsmodell kann man die Zustände der Steuerung wie folgt beschreiben:

Bei der Kernspintomographie hat man zwei Mittel zur Verfügung, um das Kernspinkollektiv zu beeinflussen: Hochfrequenzpulse und Gradientenfelder. Die Steuerung dieser Mittel erfordert im Prinzip vier Zustände:

- Wartezustand
- Hochfrequenz-Sendeaktivität
- Empfangsaktivität
- Warp-Zustand.

Das die Anlagensteuerung treibende Sequenzprogramm liefert während des Ablaufs der Messung eine Folge von Spezifikationen von Zeitscheiben, die jeweils einem der drei Zustände angehören. Die Anlagensteuerung berechnet aus diesen Angaben die in der nächsten Zeitscheibe zu realisierende Gradientenstromform und gegebenenfalls Hochfrequenzaktivität. Dadurch ergibt sich eine Latenz von maximal einer Zeitscheibe. Die Spezifikation der Zeitscheiben erfolgt abstrakt, z. B. durch direkte Angabe von k-Raumpositionen. Auf diese einzelnen Zustände wurde oben bereits eingegangen. Besonderer Erläuterung bedarf noch der Warp-Zustand:

Die optimale Gradientenstromform während des Warp-Zustands kann z. B. vom Steuerungsrechner aus der vom Sequenzprogramm gelieferten Angabe der zurückzulegenden k-Raum-Distanz vollautomatisch berechnet werden. Die vom Sequenzprogramm definierten k-Raum-Vektoren repräsentieren auch die (u. U. schrägen) Schichtpositionen. Es wird zunächst eine Vektorrotation in das physikalische Koordinatensystem angewandt und erst dann die optimale Gradientenstromform berechnet. Damit vermeidet man das eingangs geschilderte Problem herkömmlicher Anlagen, daß bei der Umsetzung vordefinierter logischer Gradienten in physikalische Gradienten komplexe Stromzeit-Verläufe entstehen, die vom Gradientenverstärker nur schwer zu beherrschen sind. Außerdem kann das Gradientensystem auch bei schrägen Schichten besser ausgenutzt werden, da man nicht - wie bei herkömmlichen Anlagen - bei der Sequenzdefinition vom worst case bezüglich der Slewrate und der Amplitude ausgehen muß. Schließlich wird bei diesem Vorgehen die Programmierung der Sequenz erheblich vereinfacht. Sowohl die obengenannte Vektorrotation als auch die Berechnung der optimalen Gradientenstromform erfolgt während des Sequenzablaufs.

In Fig. 10 ist ein Blockdiagramm für den Zeitablauf der Steuerung vorgesehen. Wie beim herkömmlichen Verfahren nach Fig. 5 wählt der Benutzer zunächst ein Meßprotokoll aus und der HOST-Computer selektiert dann verschiedene Standardwerte, die der Benutzer modifizieren kann. An diesem Punkt startet dann die Messung, wobei während des Sequenzablaufs der Steuercomputer aufgrund der Vorgaben Sollwerte für Hochfrequenz-Sendeinheit und Gradientenverstärker berechnet und den ADAC-Wandler steuert.

Anhand von Fig. 11 wird im folgenden die Berechnung eines optimalen trapezförmigen Dephasier-Gradientenpulszuges mit einem bestimmten Strom-Zeit-Integral dargestellt.

Bei konstanter Slewrate G und minimaler Anzahl Gradientenrampen ergibt sich für einen Dephasierpuls nullter Ordnung bei einem Anfangsgradient G und einem Endgradient G₂ bei einer Gesamtzeit T und einem Gradienten-Zeitintegral (k-Raum-Distanz

$$M_0 = \int_0^T G \, dt$$

der unbekannte Zwischengradient G₁.

$$G_1 = \frac{M_0 - \frac{1}{2} (G_0 + G_2) t}{T - t} \quad (1)$$

$$\text{mit } t = \frac{|G_2 - G_0|}{G} \quad (2)$$

Falls damit $G_1 > \max(G_0, G_2)$, ist G_1 tatsächlich

$$G_1 = \max(G_0, G_2) + rG \quad (3).$$

Entsprechend für $G_1 < \min(G_0, G_2)$,

$$G_1 = \min(G_0, G_2) - rG \quad (4)$$

mit dem Hilfsausdruck

$$r = \frac{T - t}{2} - \sqrt{\frac{T^2 - t^2}{4} - \frac{|M_0 - \frac{1}{2} (G_0 + G_2) T|}{G}} \quad (5)$$

Falls das Wurzelargument negativ ist oder G_1 das Amplitudenlimit überschreitet, ist der gesamte Gradientenpulszug innerhalb der Spezifikationen nicht zu realisieren.

Die Rampenzeiten t_{01} und t_{12} und die Dachzeit t_1 ergeben sich aus

$$t_{01} = \frac{|G_1 - G_0|}{G} \quad (6)$$

$$t_{12} = \frac{|G_2 - G_0|}{G} \quad (7)$$

$$t_1 = T - t_{01} - t_{12} \quad (8)$$

Patentansprüche

1. Verfahren zur Steuerung der Pulssequenz für eine MR-Anlage, **dadurch gekennzeichnet**, daß ein Sequenzprogramm in Form einer k-Raum-Struktur vorgegeben wird und daß ein Steuerdatensatz im physikalischen Bereich für Gradienten, Hochfrequenzpulse und Abtastung von Kernresonanzsignalen während der Laufzeit der Pulssequenz berechnet wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß ein die Steuerung treibendes Sequenzprogramm während der Laufzeit der Pulssequenz eine Folge von Spezifikationen von Zeitscheiben liefert, die jeweils einem der drei Zustände

- Wartezustand
- Hf-Aktivität (Senden oder Empfangen), ggf. gleichzeitig mit einem definierten Gradienten
- Warp-Zustand

angehören und daß aus diesen Angaben während der Laufzeit der Sequenz die in der nächsten Zeitscheibe zu realisierende Gradientenstromform und ggf. Hf-Aktivität ermittelt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei Gradienten-Zeit-Integrale aus einem logischen in ein physikalisches Koordinatensystem transformiert werden und wobei dann Gradientenstrom-Zeitfunktionen gebildet werden.

4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei Gradienten-Zeitfunktionen zeitscheibenweise in Echtzeit aus den Gradientenamplituden angrenzender Zeitscheiben und den in der betreffenden Zeitscheibe zu realisierenden Gradienten-Zeit-Integral berechnet werden.

5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei Gradientenstromsollwerte durch eine Folge von Gradientenamplituden-Zeitpunkt-Tupeln vorgegeben werden, die Eckpunkte im Gradienten-Zeitverlauf darstellen, wobei in Echtzeit aufeinander folgende Tupel zu Gradientenstromsollwerten auf einem diskreten Gradienten-Abstraster interpoliert werden.

6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei ein Zieltupel der Interpolation verworfen und durch das nächste Tupel ersetzt wird, sobald eine Systemuhr der Steuerung die Sollzeit des Zieltupels erreicht hat.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Spezifikation des Warp-Zustands für die Steuerung durch Vorgabe von k-Raumvektoren erfolgt.

8. Steuerung für eine MR-Anlage mit einem Steuerrechner, der aus einem in Form einer k-Raumstruktur vorgege-

benen Pulssequenzprogramm während der Laufzeit der Pulssequenz einen Steuerdatensatz für Gradientenverstärker und einen Hochfrequenz-Sende- und Empfangskanal berechnet.

Hierzu 9 Seite(n) Zeichnungen

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

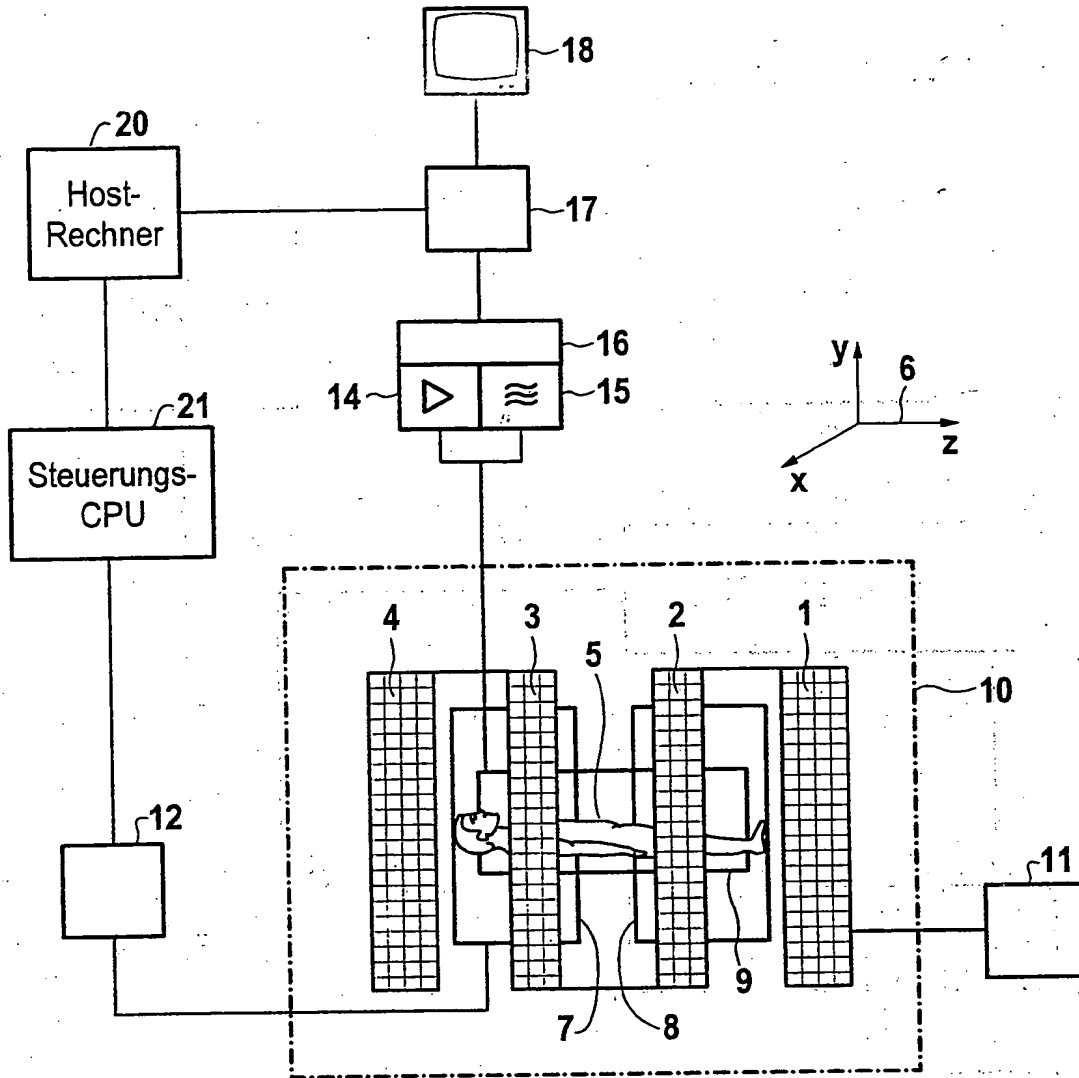


FIG 1



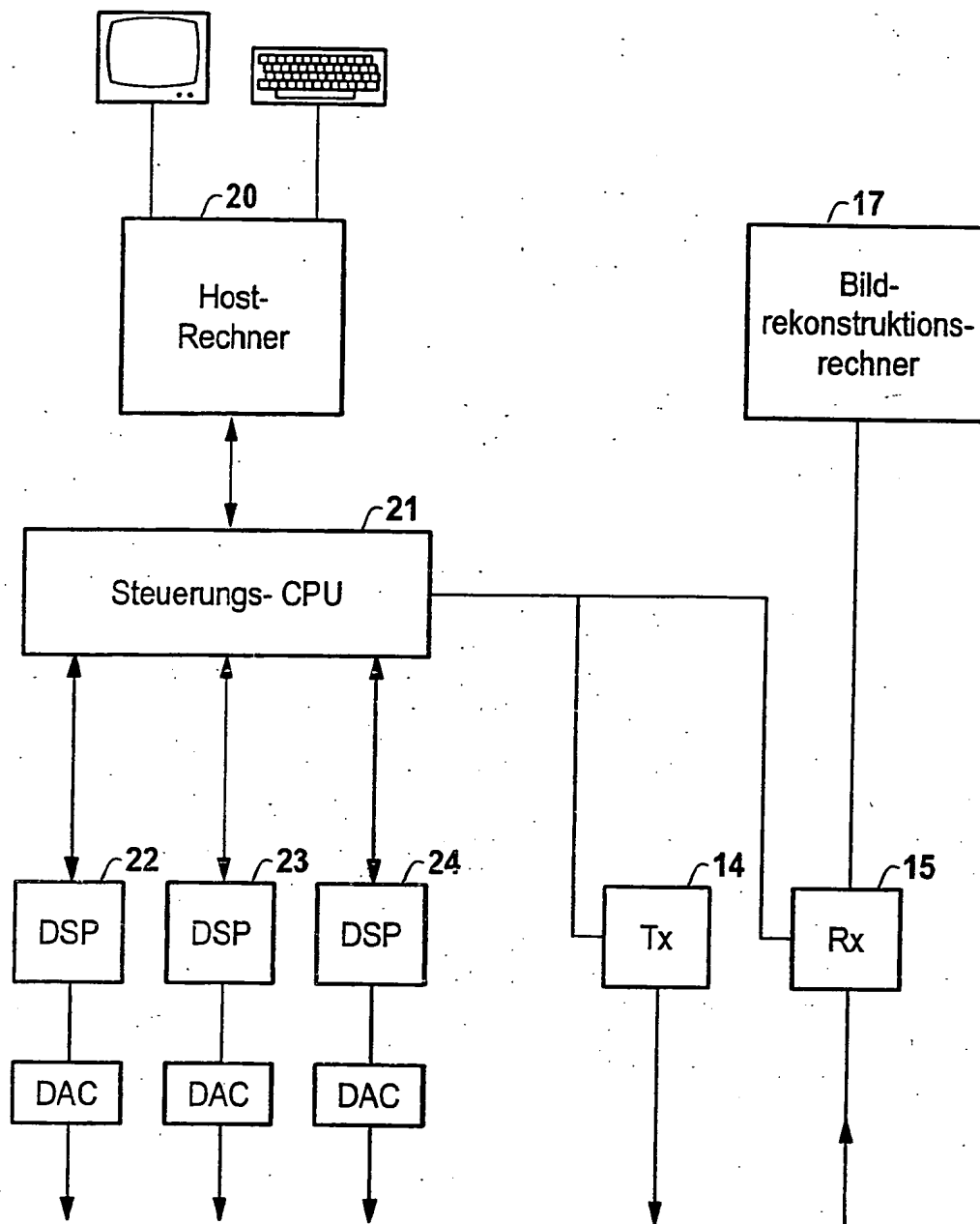


FIG 2

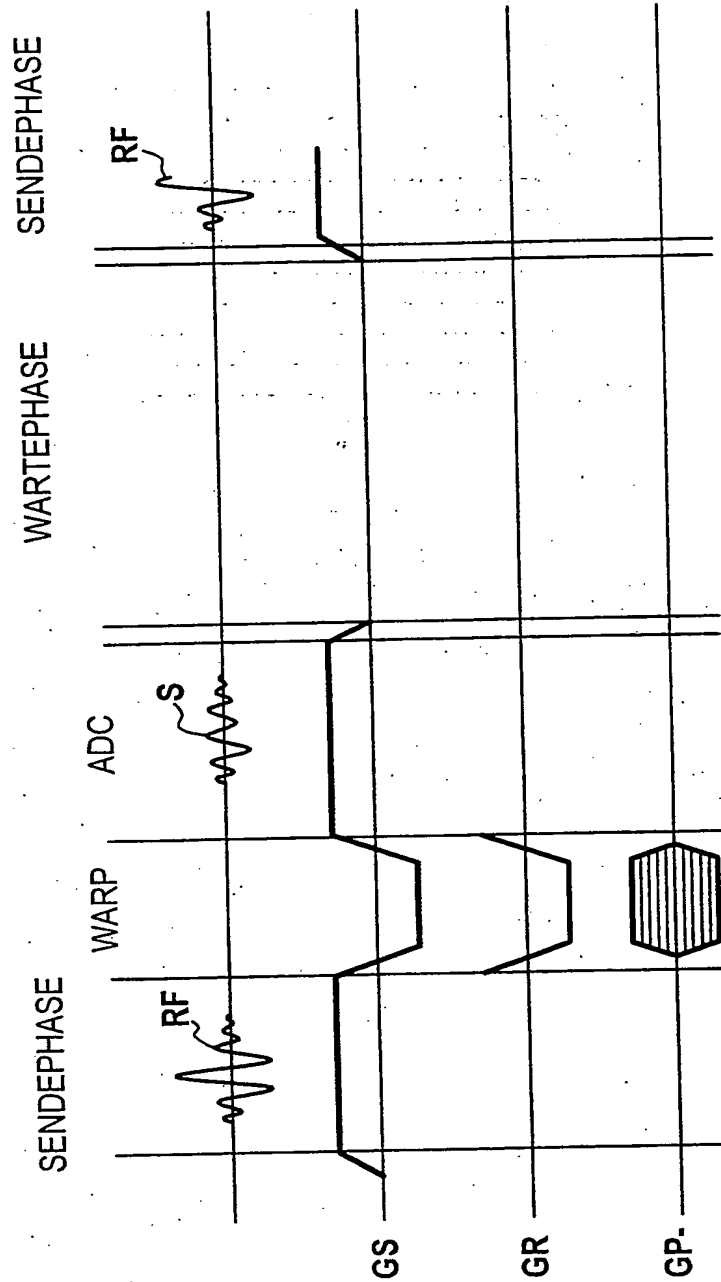


FIG 3



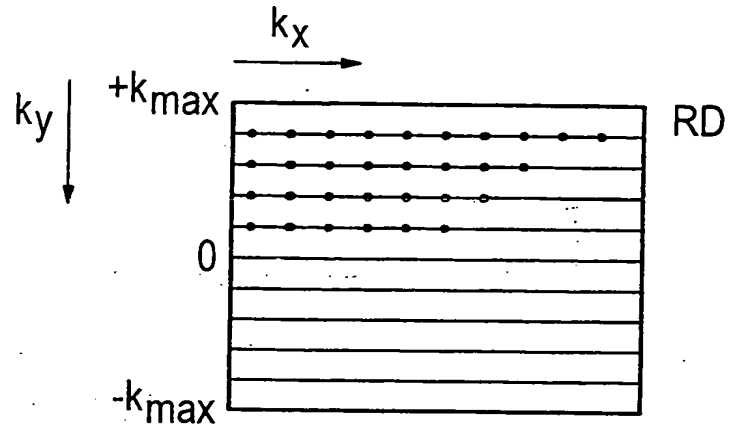


FIG 4



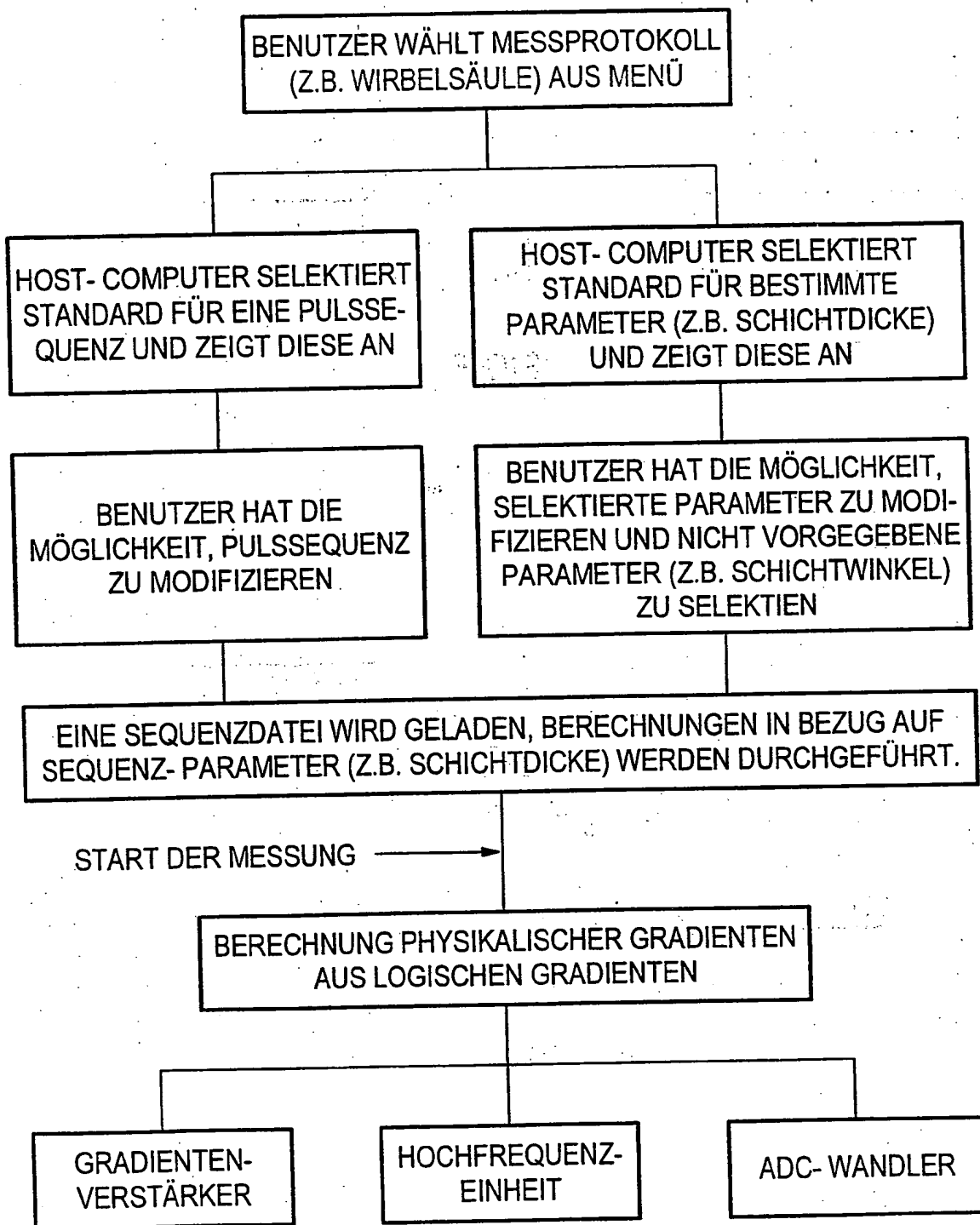


FIG 5

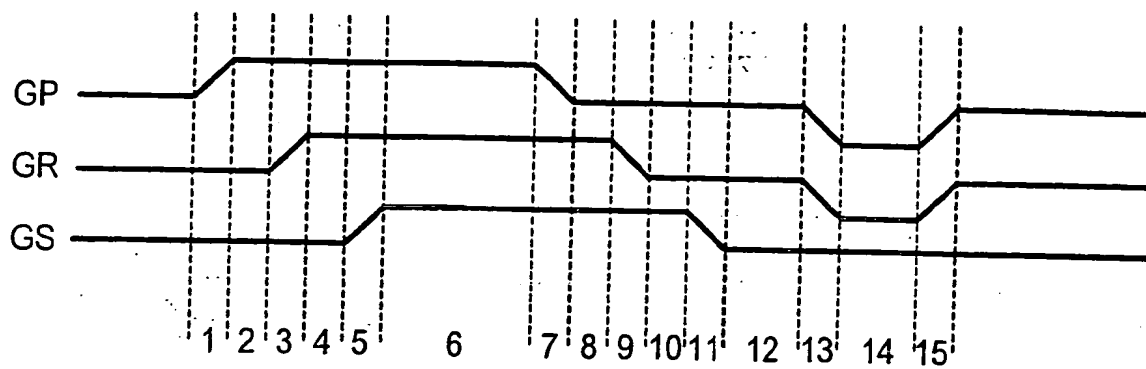


FIG 6

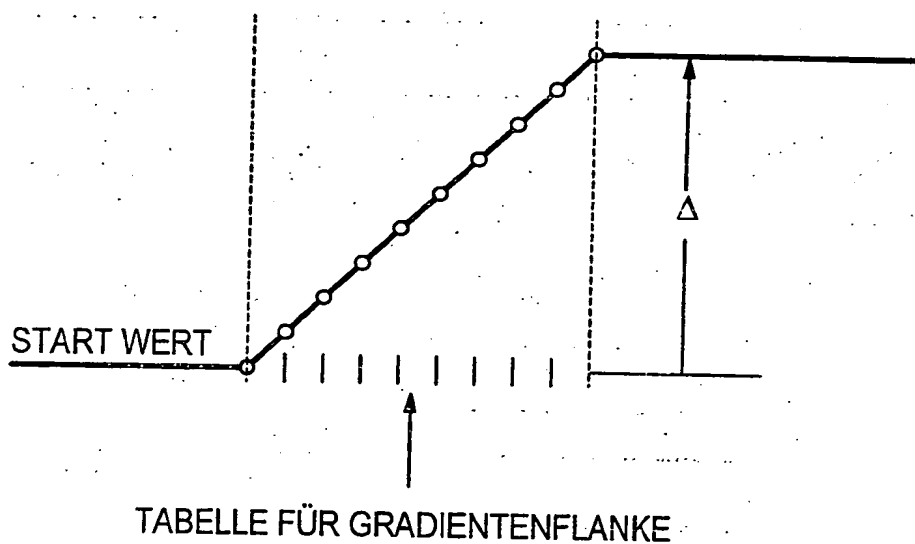


FIG 7

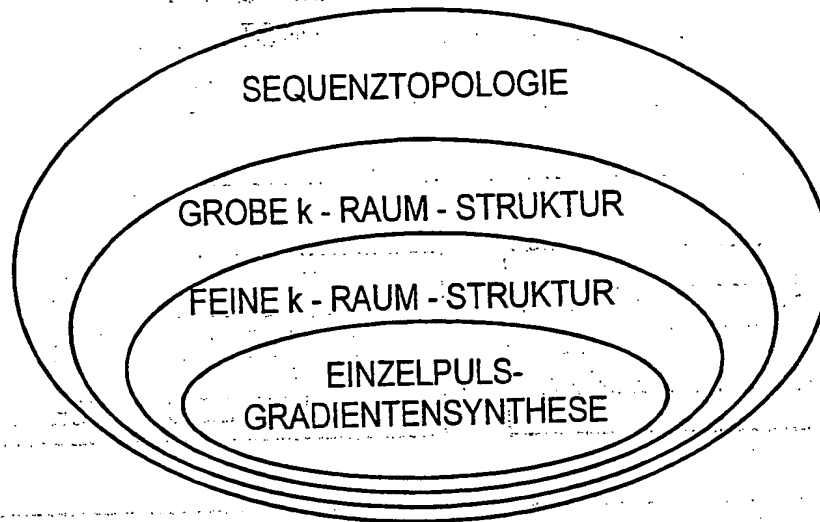


FIG 8

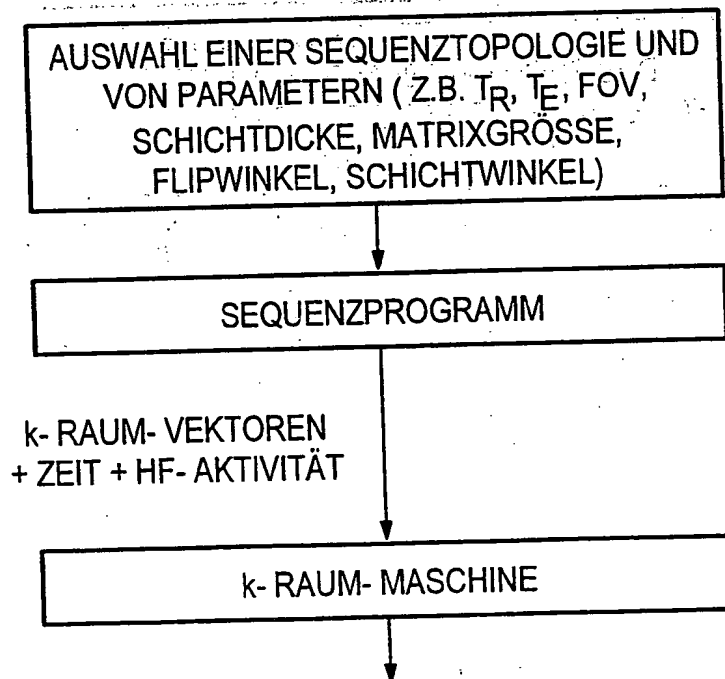


FIG 9



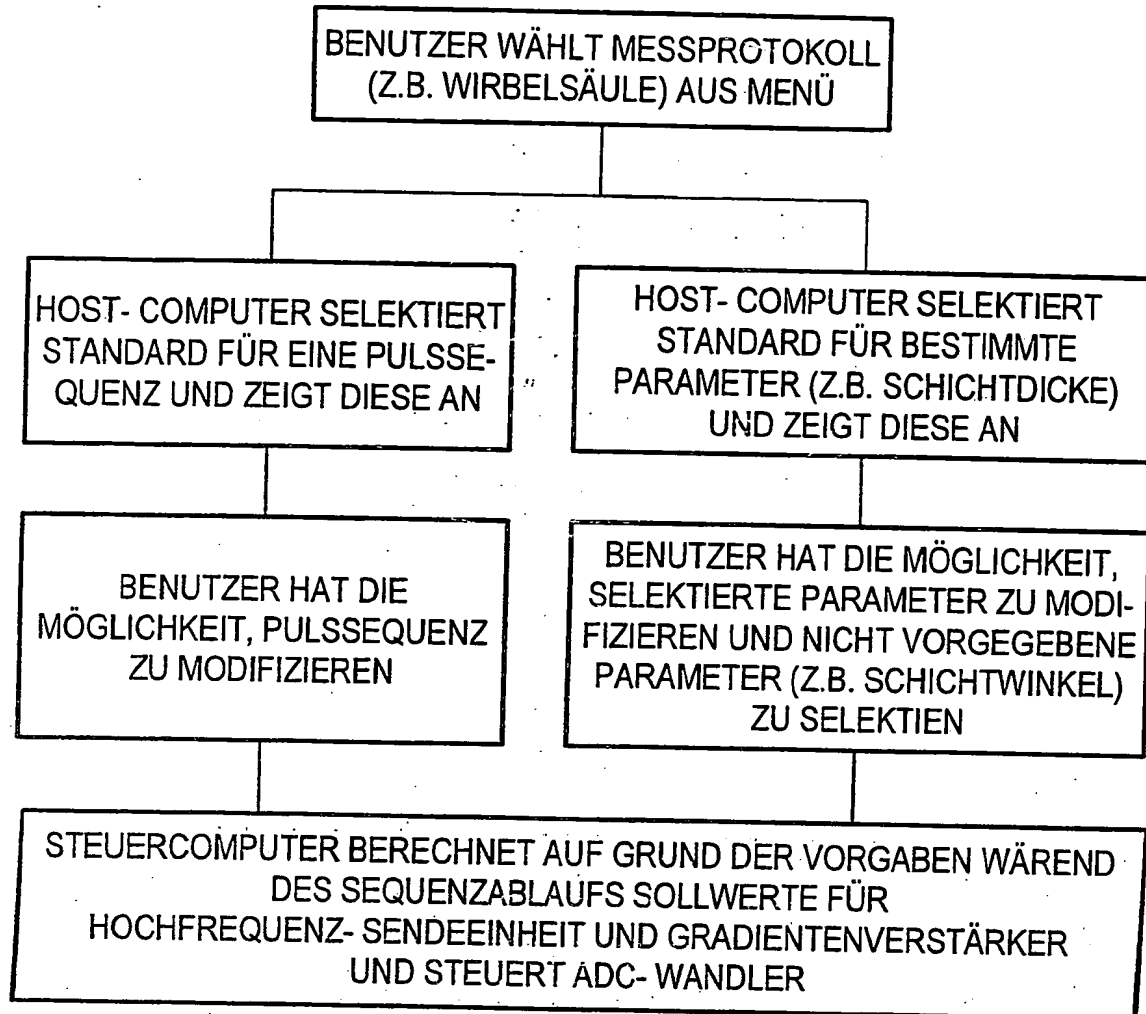


FIG 10

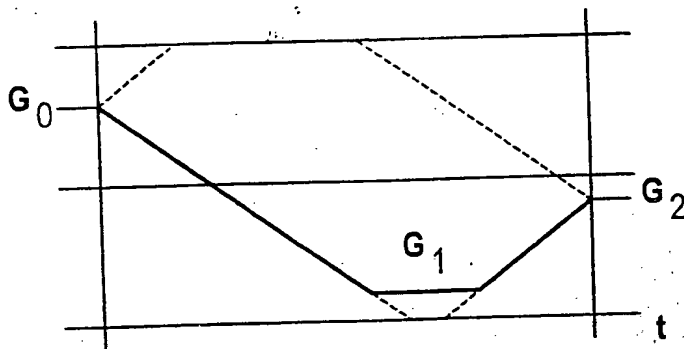


FIG 11

